doi:10.13866/j.azr.2019.04.07

新疆伊犁与哈萨克斯坦新疆野苹果〔*Malus sieversii* (Ledeb.) Roem.〕种群年龄结构①

张 苹[1,2], 吕昭智[1,3], 张 鑫[1,3], 赵想平[4], 张永光[1,3],
Gulzhanat Tanabekova[5], Maisupova Bagila[6], Adilbayeva Zhanera[7], 崔志军[8]

(1. 中国科学院新疆生态与地理研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;
3. 中国科学院干旱区生物地理与生物资源重点实验室,新疆 乌鲁木齐 830011; 4. 石河子大学,新疆 石河子 832003;
5. Al-Farabi Kazakh National University, Almaty 050040, Kazakhstan;
6. Almaty branch of "Kazakh Research Institute of Forestry" LLP, Almaty 050000, Kazakhstan;
7. Kazakh National Agrarian University, Almaty 050010, Kazakhstan; 8. 伊犁巩留县林业局, 新疆 乌鲁木齐 835400)

摘 要: 人类活动和自然环境的胁迫加速了中亚地区新疆野苹果〔*Malus sieversii* (Ledeb.) Roem.〕种群栖息环境的丧失,新疆野苹果种群面积和生存力趋于下降。本文以第三纪孑遗植物新疆野苹果为研究对象,野外系统调查新疆野苹果种群的生存现状,比较新疆伊犁和哈萨克斯坦分布的新疆野苹果种群年龄结构及果实产量,对两地当前新疆野苹果种群变化进行了分析。研究结果显示:当前伊犁地区和20世纪70年代哈萨克斯坦新疆野苹果种群的龄级结构主要以中龄(15~50 cm)树为主,而幼龄(0~15 cm)与老龄(50~75 cm)树较少。1969年和1970年哈萨克斯坦的新疆野苹果种群生存力最弱,种群为衰退型(Deevey-Ⅲ),但其产量较高;2016年和2017年伊犁的新疆野苹果种群生存力相对较弱,种群趋于衰退(Deevey-Ⅲ),产量较低;2013年哈萨克斯坦新疆野苹果种群生存力相对最强,种群最稳定(Deevey-Ⅱ);幼龄个体的缺乏是新疆野苹果种群趋于衰退的关键因子。目前,在哈萨克斯坦新疆野苹果保护区内需进行适当放牧干扰,以扩大种子的传播,提高种子的萌发;新疆地区以建立保护区为主,杜绝新疆野苹果的采收和降低野果林内的割草强度,以保护幼苗的生存数量,提高新疆野苹果的种子库,加快新疆野苹果种群更新。

关键词: 新疆野苹果种群; 静态生命表; 年龄结构; 新疆伊犁; 哈萨克斯坦

新疆野苹果〔*Malus sieversii* (Ledeb.) Roem.〕属蔷薇科,苹果属,是中亚天山山脉的第三纪孑遗树种,现主要分布在哈萨克斯坦的准噶尔阿拉套、外伊犁阿拉套,吉尔吉斯斯坦的费尔干纳、卡特卡里山区以及我国新疆伊犁地区的新源县、巩留县和霍城县等地[1-2]。新疆野苹果是现代栽培苹果(*Malus domestica*)的起源种,种内变异丰富,在种质资源保存及遗传发育研究中具有不可替代的作用,现已被列为我国的优先保护物种[3-5]。在哈萨克斯坦,新疆野苹果多分布于不同级别的保护区内,保护相对较好,目前分布面积达12 083 hm^2 但其种群更新存在幼苗数量不足问题[6]。20世纪50年代,我国新疆野苹果分布面积约9 000 hm^2,但由于病虫害及人类活动的干扰,新疆野苹果大量死亡,目前分布面积已不足5 000 hm^2,该种已于1991年在《中国植物红皮书》中被列为我国濒危二级保护植物[7-8]。显而易见,中亚地区新疆野苹果种群的生存及更新亟待拯救,其栖息地急需要保护。

树木的更新是保护生物多样性及维持森林生态系统稳定的重要方式,通常用树木径级结构表示树木当前及未来的更新状况[9-10]。树木种群的更新状况则取决于当前幼苗及幼树的数量是否充足,其生存力、生长力以及新生幼苗的再生率是否良好[11],而在自然森林生态系统中,受种源、种子的传播和幼苗、幼树建成的影响,使种群更新受阻[12]。目前,我国新疆野苹果正面临种群更新困难这一挑战。为解决这一难题,研究人员从多个方面进行了研究,尤其在病虫害防治[13]、种质遗传及分子生物

① **收稿日期:** 2018-12-10; **修订日期:** 2019-03-18
基金项目: 国家重点研发计划(2016YFC0501502)资助
作者简介: 张苹(1996-),女,在读硕士生,主要从事动物生态学研究
通讯作者: 吕昭智. E-mail: zhaozhi@ms.xjb.ac.cn

学[14-15]等方面研究较多,而针对新疆野苹果的种群动态研究尚不充分,特别是哈萨克斯坦地区的新疆野苹果种群结构未见详细报道。为此,本文主要以新疆伊犁和哈萨克斯坦的新疆野苹果为研究对象,通过种群静态生命表、存活曲线以及生存函数对新疆野苹果的种群动态进行了分析,以期探明中亚地区新疆野苹果种群的变化,帮助理解新疆野苹果更新现存的问题,为保护新疆野苹果提供理论依据。

1　研究区概况

1.1　新疆伊犁地区概况

研究区在新疆伊犁新源县和巩留县境内。新源县位于伊犁河谷东端,年均气温 8.1 ℃,年均降水量 480 mm,新疆野苹果林主要分布在新源县伊犁植物园保护区(83°36′E,43°22′N),垂直分布于海拔 1 200 ~ 1 400 m[16-18]。巩留县位于伊犁河谷中东部,年均气温 7.4 ℃,年均降水量 256 mm,新疆野苹果林主要分布于巩留山地阴坡及河流两岸,海拔 1 200 ~ 1 500 m,总分布面积为 1 696.8 hm^2[16,19]。新疆野苹果林内还伴生其他树种、灌木及草本植物,主要有野杏(*Armeniaca vulgaris*)、樱桃李(*Prunus cerasifera*)、准噶尔山楂(*Crataegus songorica*)、天山桦(*Betula tianschanica*)、新疆忍冬(*Lonicera tatarica*)、异果小檗(*Berberis heteropoda*)、龙芽草(*Agrimonia pilosa*)等[20-21]。

1.2　哈萨克斯坦研究区概况

研究区在哈萨克斯坦阿拉木图州伊犁阿拉套国家自然公园(Ili-Alatau National Natural Park)保护区内(77.68°E,43.38°N),保护区建于 1996 年,面积为 199 673.5 hm^2[6]。新疆野苹果主要分布在天山海拔 1 400 ~ 1 800 m 的东北部斜坡,林间郁闭度为 55%,林内伴生大量天山花楸(*Sorbus aucuparia*)和银白杨(*Populus alba*),平均树龄达 70 a。林下分布有大量野蔷薇(*Rosa canina*)、绣线菊属(*Spiraea*)及栒子属(*Cotoneaster*)等灌木和草本植物。土质为高山草甸黑土地,富含丰富的腐殖质[2,22]。

2　研究方法

2.1　新疆伊犁地区新疆野苹果林种群结构数据采集

2016 年和 2017 年,在新源县和巩留县共选取 7 个具有代表性的样区(表 1)。在每个样区内设置 3 个半径 20 m 的圆形样地,面积为 0.755 hm^2,7 个样区共 42 个样地作为本次的数据采集点。统计各样地内新疆野苹果树的胸径(*DBH*)、果实产量等指标,共计数据样本量 545 棵。

表 1　伊犁调查样区基本情况

Tab. 1　Basic situation of the survey sample area in Ili

地点	纬度(N)	经度(E)	海拔/m	面积/hm^2	地形与坡向
八连	43.24°	82.77°	1 350	0.755	山地阴阳坡
小莫合	43.18°	82.73°	1 200	0.755	山地阴坡
大莫合	43.22°	82.75°	1 200	0.755	山地阴坡
交勒塞	43.23°	82.78°	1 350	0.755	山地阴坡
萨哈	43.26°	82.86°	1 300	0.755	山地阴坡
吉尔格郎乡	43.20°	82.60°	1 450	0.755	山地阴坡
新源	43.38°	83.61°	1 400	0.755	山地阴坡

2.2　哈萨克斯坦新疆野苹果林种群结构数据采集

2013 年,在阿拉木图国家自然公园的保护区内选取 7 个样地,样地面积为 0.25 hm^2。统计样地内物种种类、数量、胸径及树冠直径,共计样本量 158 棵。1969 年和 1970 年,哈萨克斯坦新疆野苹果缺乏胸径数据,仅有基径数据,共计样本量 130 棵,数据来自历史资料[23]。

新疆伊犁与哈萨克斯坦的新疆野苹果属同一野果林生态系统[2]。调查数据显示,新疆野苹果的胸径与基径显著正相关,依据林木基径与胸径线性相关关系[24-25],采用 Origin 9.0 软件对新疆野苹果的胸径与基径进行回归分析,用线性方程推算 1969 年和 1970 年哈萨克斯坦新疆野苹果的胸径数据,用于后期数据转化分析。线性方程为:

$$DBH_i = aDB_i + b \tag{1}$$

式中:DBH_i 为新疆野苹果胸径;DB_i 为新疆野苹果基径;a 和 b 为方程系数。

2.3　新疆野苹果种群龄级分级

树木常用胸径结构代替年龄结构研究种群年龄结构[9,17,20]。参照刘忠权等[17]划分新疆野苹果胸径的方法(*DBH* 每 5 cm 划分为一个级),将新疆野苹果共划分为 15 个胸径级别(Ⅰ龄级为 0 cm < *DBH*≤5 cm,Ⅱ龄级为 5 cm < *DBH*≤10 cm,…,XIV 龄级为 65 cm < *DBH*≤70 cm,XV 龄级为 *DBH* > 70 cm),统计各龄级的植株数,分析胸径数据,编制静态生命表,用 Origin 9.0 软件绘制种群年龄结构图与存活曲线。

2.4　静态生命表的编制与存活曲线绘制

生命表编制方法及数据匀滑处理参考刘忠权等

人的方法[17]。2013 年哈萨克斯坦与伊犁种群从第Ⅳ级开始拟合,1969 年和 1970 年哈萨克斯坦的新疆野苹果种群从第Ⅴ级开始拟合,拟合时自变量为龄级,因变量为新疆野苹果各龄级的个体数,拟合方程见表 2。根据 Deevey 提出的存活曲线,本文以胸径(*DBH*)所对应的龄级为横坐标,以标准化存活个体数对数为纵坐标,绘制新疆野苹果种群存活曲线[26]。

表 2　哈萨克斯坦与伊犁新疆野苹果胸径(*DBH*)匀滑方程

Tab. 2　Smoothing equations of *DBH* of *Malus sieversii* in Kazakhstan and Ili of Xinjiang

地区(年份)	拟合方程	相关系数(R^2)	*P* 值
哈萨克斯坦(1969 年和 1970 年)	$y = 1\,483.88 + 300x^{-2.38}$	0.75	$P < 0.001$
哈萨克斯坦(2013 年)	$y = 111.56x^{-1.14}$	0.41	$P < 0.001$
新疆伊犁(2016 年和 2017 年)	$y = 2\,086.05x^{-1.968}$	0.93	$P < 0.001$

注:*x* 为龄级;*y* 为新疆野苹果各龄级的个体数。

2.5　种群生存分析

引入 4 个生存分析函数分析新疆野苹果的种群结构,阐明其生存规律。生存函数分别为:危险率函数(λ_{tx})、死亡密度函数(f_{tx})、累计死亡率函数(F_x)、种群生存率函数(S_x)。生存率函数以种群个体的生存期大于 *t* 的概率来描述种群的生存规律,曲线单调递减。累计死亡率是描述一个种群在存活期内总体死亡状况的函数,为单调递增函数。死亡密度函数是表征种群个体在特定时段内的死亡概率,能直观反映种群个体的死亡情况。危险率函数表征种群个体的生存期达到 t 时的瞬时死亡率[17,20,26-27]。计算公式如下:

$$S_{(x)} = S_1 \times S_2 \times S_3, \cdots S_x \quad (2)$$

$$F_x = 1 - S_x \quad (3)$$

$$f_{tx} = (S_x - S_{x+1}) / h_x \quad (4)$$

$$\lambda_{(tx)} = 2(1 - S_{x+1} / S_x) / h_x (S_{x+1} / S_x) \quad (5)$$

式中:S_x 为种群存活率;S_{x+1} 为下一龄级种群存活率;h_x 为龄级宽度;*x* 为龄级;*t* 为某一段时间内新疆野苹果胸径(*DBH*)的大小值;*tx* 表示 *t* 时段的龄级。

根据上述计算公式计算 4 个生存函数的值,来绘制危险率曲线、死亡密度曲线、累积死亡率曲线和生存率曲线图。

3　结果与分析

3.1　新疆野苹果种群龄级结构研究

伊犁新疆野苹果胸径与基径的拟合线性方程为:

$$DBH_i = 0.63 DB_i + 4.45, (R^2 = 0.74, P < 0.05) \quad (6)$$

式中:DBH_i 为胸径(cm);DB_i 为基径(cm)。将哈萨克斯坦新疆野苹果基径数值带入方程即可求得胸径数据,由此建立 1969 年和 1970 年新疆野苹果龄级结构。

结果显示,新疆野苹果种群在哈萨克斯坦和新疆伊犁均以中龄级树(Ⅳ ~ Ⅹ龄级,16 ~ 50 cm)为主,而幼龄(Ⅰ ~ Ⅲ龄级,0 ~ 15 cm)与老龄(Ⅺ ~ ⅩⅤ龄级,50 ~ 75 cm)个体较少。在 1969 年和 1970 年,哈萨克斯坦新疆野苹果幼龄树占 10.77%,幼龄树只有Ⅲ龄级个体,中龄树占 86.15%,老龄树则为 3.08%;2013 年,哈萨克斯坦新疆野苹果幼龄与老龄个体比例相当,均为 21.52%,中龄树为 56.96%;2016 年和 2017 年,新疆伊犁新疆野苹果种群各龄级均有个体分布,幼龄树为 15.96%,中龄树为 80.00%,老龄树为 4.04%(图 1)。

3.2　新疆野苹果种群静态生命表

在哈萨克斯坦和新疆伊犁,新疆野苹果种群的消失率和死亡率曲线变化趋势基本一致,均为第Ⅰ龄级最高,在幼龄阶段下降迅速,中龄阶段趋于平缓,老龄阶段达到最低,其中哈萨克斯坦种群(2013

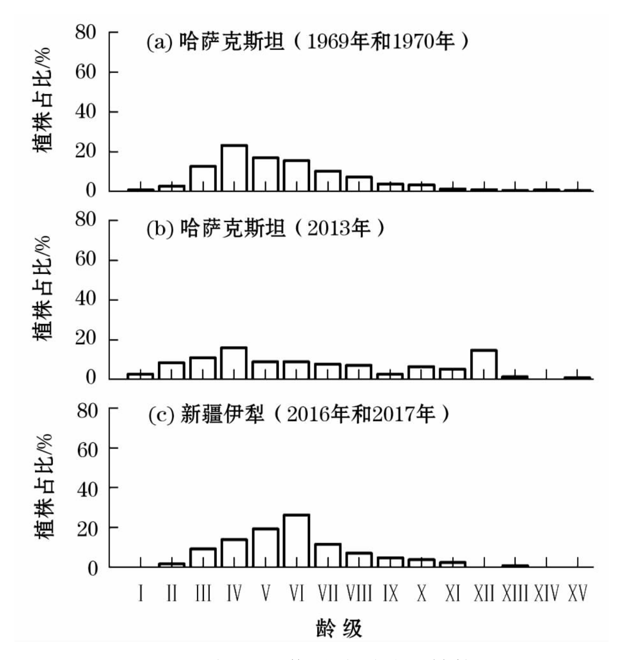


图 1　新疆野苹果种群龄级结构

Fig. 1　Age structure of *Malus sieversii* population

年）的死亡率和消失率最低,1969 年和 1970 年哈萨克斯坦种群的死亡率与新疆伊犁（2016 年和 2017 年）的死亡率相近,但消失率高于新疆伊犁地区;从平均期望寿命（E_x）分析来看,在幼龄期到中龄期,新疆野苹果种群的生命期望值随龄级的增大而增高,到老龄期又开始降低（表3）,整体上20世纪70

表 3　新疆野苹果种群静态生命表

Tab. 3　Static life table of *M. sieversii* population

地区	龄级/cm	A_x	a_x	l_x	d_x	q_x	L_x	T_x	E_x	K_x	S_x
哈萨克斯坦	Ⅰ	0	1 484	1 000	808	0.81	596	876	0.88	1.65	0.22
（1969 年和 1970 年）	Ⅱ	2	285	192	119	0.62	133	280	1.46	0.97	0.41
	Ⅲ	12	109	73	36	0.50	55	147	2.01	0.68	0.53
	Ⅳ	18	55	37	15	0.41	29	92	2.50	0.53	0.61
	Ⅴ	25	32	22	8	0.35	18	63	2.90	0.43	0.67
	Ⅵ	34	21	14	4	0.31	12	45	3.21	0.37	0.71
	Ⅶ	15	14	10	3	0.27	8	33	3.41	0.32	0.74
	Ⅷ	9	11	7	2	0.24	6	25	3.50	0.28	0.77
	Ⅸ	6	8	5	1	0.22	5	19	3.47	0.25	0.79
	Ⅹ	5	6	4	1	0.20	4	14	3.31	0.23	0.80
	Ⅺ	3	5	3	1	0.19	3	10	3.03	0.21	0.82
	Ⅻ	0	4	3	0	0.17	2	7	2.61	0.19	0.83
	ⅩⅢ	1	3	2	0	0.16	2	5	2.05	0.18	0.84
	ⅩⅣ	0	3	2	0	0.15	2	3	1.35	0.16	0.46
	ⅩⅤ	0	2	2	–	–	1	1	0.50	–	–
哈萨克斯坦	Ⅰ	4	112	1 000	546	0.55	727	2 364	2.36	0.79	0.45
（2013 年）	Ⅱ	13	51	454	168	0.37	370	1 637	3.61	0.46	0.63
	Ⅲ	17	32	286	80	0.28	246	1 267	4.43	0.33	0.72
	Ⅳ	25	23	206	46	0.22	183	1 021	4.96	0.25	0.78
	Ⅴ	14	18	160	30	0.19	145	838	5.25	0.21	0.81
	Ⅵ	14	14	130	21	0.16	119	694	5.35	0.18	0.84
	Ⅶ	12	12	109	15	0.14	101	574	5.28	0.15	0.86
	Ⅷ	11	10	93	12	0.13	88	473	5.07	0.13	0.87
	Ⅸ	4	9	82	9	0.11	77	386	4.72	0.12	0.89
	Ⅹ	10	8	72	7	0.10	69	309	4.26	0.11	0.90
	Ⅺ	8	7	65	6	0.09	62	240	3.69	0.10	0.91
	Ⅻ	23	7	59	5	0.09	56	178	3.03	0.09	0.91
	ⅩⅢ	2	6	54	4	0.08	52	122	2.27	0.08	0.92
	ⅩⅣ	0	6	49	4	0.08	47	70	1.42	0.08	0.92
	ⅩⅤ	1	5	46	–	–	23	23	0.50	–	–
新疆	Ⅰ	4	2 086	1 000	744	0.74	628	1 103	1.10	1.36	0.26
（2016 年和 2017 年）	Ⅱ	15	533	256	141	0.55	185	475	1.86	0.80	0.45
	Ⅲ	68	240	115	50	0.43	90	290	2.52	0.57	0.57
	Ⅳ	126	136	65	23	0.36	54	200	3.06	0.44	0.64
	Ⅴ	92	88	42	13	0.30	36	146	3.47	0.36	0.70
	Ⅵ	84	61	29	8	0.26	26	110	3.75	0.30	0.74
	Ⅶ	56	45	22	5	0.23	19	85	3.91	0.26	0.77
	Ⅷ	39	35	17	3	0.21	15	66	3.93	0.23	0.79
	Ⅸ	21	28	13	2	0.19	12	51	3.82	0.21	0.81
	Ⅹ	18	22	11	2	0.17	10	39	3.59	0.19	0.83
	Ⅺ	7	19	9	1	0.16	8	29	3.23	0.17	0.84
	Ⅻ	5	16	8	1	0.15	7	21	2.74	0.16	0.85
	ⅩⅢ	3	13	6	1	0.14	6	14	2.12	0.15	0.86
	ⅩⅣ	4	12	6	1	0.13	5	8	1.37	–	–
	ⅩⅤ	3	10	5	–	–	2	2	–	–	–

注:x 为龄级;A_x 为 x 龄级内现有存活个体数;a_x 为 A_x 匀滑修正后的存活个体数;l_x 为 x 龄级开始标准化的存活个体数;d_x 为从 x 龄级到 $x+1$ 龄级间的标准化死亡数;q_x 为从 x 龄级到 $x+1$ 龄级间的死亡率;L_x 为 x 龄级到 $x+1$ 龄级间平均存活的个体数;T_x 为从 x 龄级到超过 x 龄级的存活个体总数;E_x 为 x 龄级内个体的平均期望寿命;K_x 为种群消失率;S_x 为种群存活率。

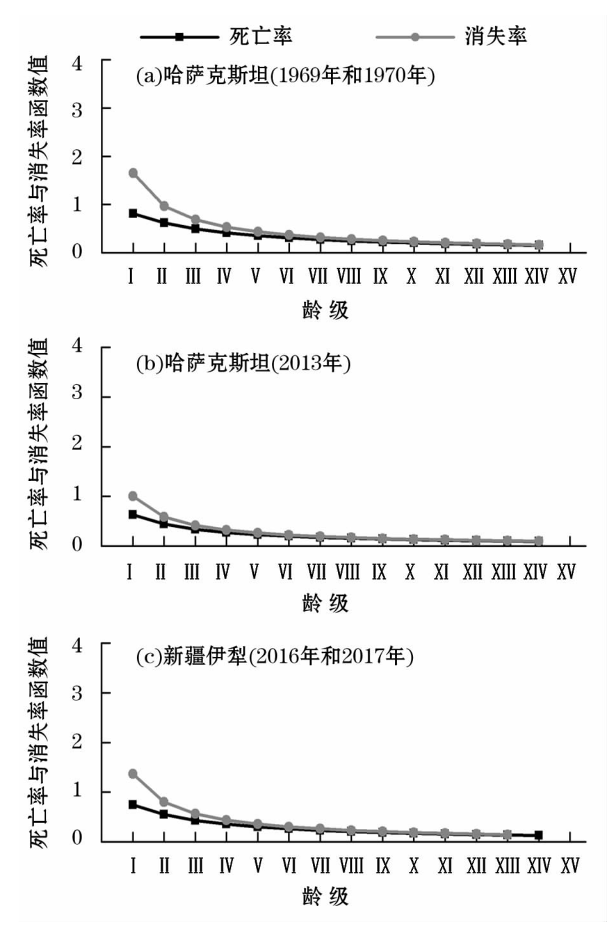


图 2 新疆野苹果种群死亡率曲线(q_x)和种群消失率曲线(K_x)

Fig. 2 Mortality rate (q_x) and disappearance rate (K_x) of *Malus sieversii* population

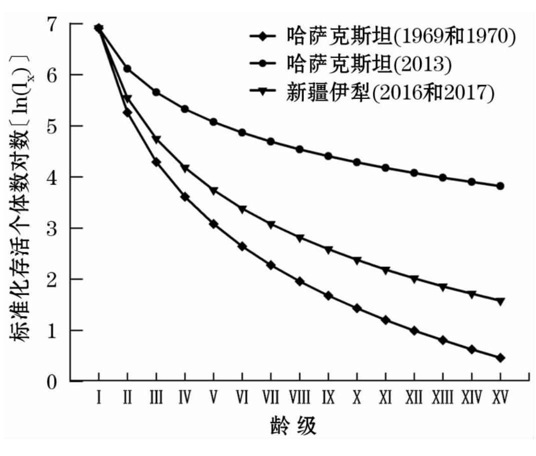


图 3 疆野苹果种群存活曲线

Fig. 3 Survival curves of *Malus sieversii* population

年代哈萨克斯坦新疆野苹果种群的生存力相对最弱，其次为新疆伊犁(2016 年和 2017 年)，哈萨克斯坦(2013 年)种群生存力最强(图 2)。

3.3 存活曲线分析

哈萨克斯坦(1969 年和 1970 年)和新疆伊犁(2016 年和 2017 年)新疆野苹果种群的存活曲线属于 Deevey-Ⅲ型，表现为前期个体死亡率极高，后期逐渐降低趋于稳定，尤其在Ⅰ-Ⅳ龄级存活率下降最快，幼龄个体死亡率极高，这一阶段可能主要受外界环境因子(放牧、割草及人类活动)干扰过大，而 2013 年，哈萨克斯坦种群存活曲线趋于 Deevey-Ⅱ型，各龄级间死亡率接近，变化稳定，这与多年保护区的建立有关(图 3)。

3.4 种群生存

在哈萨克斯坦和新疆伊犁，新疆野苹果种群的生存函数曲线变化趋势显示一致，均为生存率(S_x)、死亡密度(f_{tx})、危险率(λ_{tx})函数值随龄级的增大不断下降，累积死亡率(F_x)随龄级的增大不断上升。哈萨克斯坦(2013 年)生存率、死亡密度最高，危险率最低，其Ⅰ龄级生存率与死亡密度最高，分别为 0.45、0.033，危险率最高为 0.25；其次为新疆伊犁(2016 年和 2017 年)，Ⅰ龄级生存率、死亡密度最高，分别为 0.26、0.028，危险率最高为 0.31；而哈萨克斯坦(1969 年和 1970 年)生存率和死亡密度最低，危险率最高，在Ⅰ龄级生存率、死亡密度最高，分别为 0.19、0.007，危险率最高为 0.39。哈萨克斯坦(2013 年)累积死亡密度从Ⅶ龄级开始为 0.90，新疆伊犁(2016 年和 2017 年)从Ⅲ龄级开始达 93% 以上，而哈萨克斯坦(1969 年和 1970 年)从Ⅱ龄级开始就达 0.90 以上，此外在 1969 年和 1970 年，哈萨克斯坦种群在老龄(ⅩⅢ龄级)期风险率又突然增高，为 0.31，表现出高死亡率。以上结果表明，在哈萨克斯坦和伊犁地区，目前新疆野苹果幼龄个体受放牧、割草、人类活动等环境因子的胁迫大，死亡严重，种群整体表现幼龄个体匮乏，中老龄相对稳定(图 4)。

3.5 新疆野苹果果实产量

在 1969 年和 1970 年，哈萨克斯坦与新疆伊犁 2016 年和 2017 年的平均单株果实产量差异显著($F=253.3$，$P<0.05$)，前者产量为 138.1 kg·棵$^{-1}$，后者产量分别为 2.04 kg·棵$^{-1}$、5.2 kg·棵$^{-1}$。哈萨克斯坦(1969 年和 1970 年)与新疆伊犁(2016 年和 2017 年)的平均单株果实产量最大相差 68 倍。从土壤种子库角度分析，这一结果说明伊犁地区新疆野苹果土壤种子库的地上种源显著低于哈萨克斯坦，果实产量的降低将会降低伊犁新疆野苹果土壤种子库的大小(图 5)。

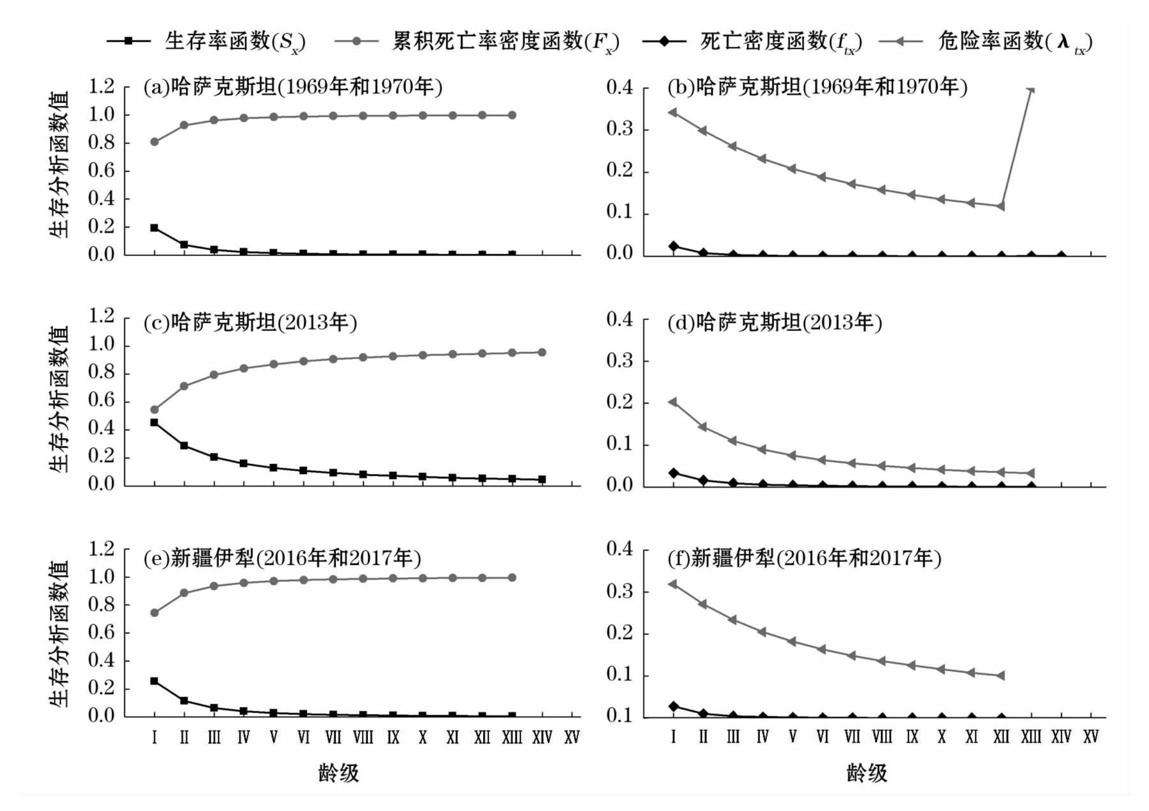


图 4　疆野苹果种群生存分析曲线

Fig. 4　Survival analysis curves of *Malus sieversii* population

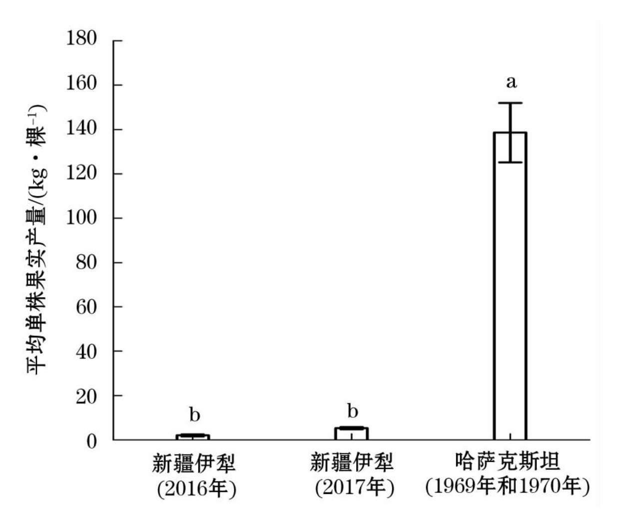


图 5　平均单株新疆野苹果果实产量

Fig. 5　Fruit yield of *Malus sieversii*

4　讨 论

4.1　不同种群(中国与哈萨克斯坦)年龄结构基本特征

新疆野苹果在哈萨克斯坦生存良好,在我国则属于濒危物种。研究显示濒危植物种群为衰退型,在年龄结构中缺乏幼龄个体[28],本研究也得出同样的结果。在伊犁地区,新疆野苹果种群生存曲线为 Deevey-Ⅲ型,早期死亡率高,整体趋于衰退,年龄结构主要以中龄树为主,占 80%,而幼龄与老龄树较少,仅占 15.96% 和 4.04%,这与刘忠权、马闯等在新疆的研究结果一致[17,20]。在哈萨克斯坦,20 世纪 70 年代,新疆野苹果种群也表现出相似的年龄结构特点,生存曲线也为 Deevey-Ⅲ型,种群衰退,年龄结构以中龄树为主,占 86.15%,幼龄树仅占 10.77% 左右。相比而言,经 20 多年的保护,到 2013 年,哈萨克斯坦新疆野苹果种群结构趋于稳定,种群生存曲线接近 Deevey-Ⅱ,各龄级间死亡率基本相同,幼龄与老龄个体比例有所上升,占 20% 左右。显而易见,无论 20 世纪 70 年代的哈萨克斯坦,还是当前新疆伊犁地区,新疆野苹果幼龄数量的匮乏是种群趋于衰退的主要原因,而保护幼龄个体,增加幼龄个体的存活数是种群趋于稳定的关键。

4.2　不同时间两个种群(中国与哈萨克斯坦)的年龄结构变化趋势与特征

静态生命表反映了新疆野苹果种群各龄级的变化趋势。结果显示,新疆野苹果种群在幼龄期的生命期望值最低,死亡率、消失率最高,而中老龄个体死亡率、消失率相对较低,个体趋于稳定。其中在 1969 年和 1970 年,哈萨克斯坦地区种群的幼龄个

体生命期望值最低,死亡率、消失率最高,尤其Ⅰ龄级个体死亡率极高,达0.81,其次为2016年和2017年新疆伊犁地区的种群,同样Ⅰ龄级死亡率最高,达0.74,而2013年,哈萨克斯坦种群的生命期望值最高,死亡率和消失率最低,但幼龄期仍表现出相对较高的死亡率,在Ⅰ龄级的死亡率为0.55。这一结果表明,新疆野苹果幼苗生存力极其脆弱,难以生长为幼龄个体,这是种群趋于衰退的主要环节。

4.3 不同种群(中国与哈萨克斯坦)的年龄结构与生境因子的关系

新疆野苹果幼龄个体的更新主要依靠种子繁殖和营养体(根、茎)繁殖,更新状况受种子库大小、种子萌发率、幼苗存活率及克隆繁殖成功率的影响[23]。在伊犁地区调查发现,新疆野苹果林区内,春季可发现成簇的实生苗,但到秋季后几乎无存活幼苗。分析其原因,每年秋季,收割牧草的扰动可造成存活幼苗大量减少;林下高植被盖度(植被平均高度达1.6 m)也会影响幼苗的生长[17];秋季放牧集中期,存活幼苗与幼龄个体常被啃食,残缺植株也难以长为健康幼龄个体[16-17];耕地入侵林地、年降水少、生境条件差也是伊犁新疆野苹果种群趋于衰退的原因[13,20]。

果实作为新疆野苹果种子的主要来源,是组成土壤种子库的重要部分,其产量影响土壤种子库的大小,本研究通过比较早期(1969年和1970年)哈萨克斯坦和当前(2016年和2017年)伊犁地区新疆野苹果的果实产量,发现在20世纪70年代,哈萨克斯坦种群有较高的果实产量,是伊犁地区果实产量的68倍。显而易见,在伊犁地区,新疆野苹果的果实产量不利于林下土壤种子库的建成,其种群更新潜力不足。这一结果与刘璐等的研究结果一致,在新疆野苹果林下土壤种子库中未发现新疆野苹果目标种子[29]。在新疆伊犁,新疆野苹果土壤种子库的建成还受苹果小吉丁虫(*Agrilus mali* Matsumura)的影响。崔志军等的研究显示,新疆野苹果树受该虫危害越严重,其果实产量越低,其中部分果实在未成熟时就已脱落,种子不仅产量降低,而且无萌发活力,从而造成种子库的地上种源大大减少,影响种群的更新[30]。此外,伊犁地区还存在采收大量果实用于制种育苗的农业经济活动,这可能会进一步降低土壤种子库的大小,影响幼苗的更新[31]。

物种的衰退及濒危是内外因素综合作用的结果,而外在干扰因素是植物趋于濒危的主要推动力[28,32]。20世纪世纪50年代,在哈萨克斯坦,大量新疆野苹果被砍伐用于生活取暖和扩建农业果蔬园林,后期又因周边城市的发展,居民建筑及休闲娱乐场所又代替了大片新疆野苹果林[2,6]。这种早期的乱砍滥伐和近期的城市资源占用,造成早期新疆野苹果林的锐减,使整个种群结构遭到破坏,降低了新疆野苹果应对不良环境的抵抗力,致使种群逐渐趋于衰退。

哈萨克斯坦研究样点位于新疆野苹果自然保护区内,保护区于1950年左右建立,长期的自然保护使森林生态得到系统的恢复,新疆野苹果种群到2013年显示趋于稳定,但幼龄个体仍然相对较少,这一结果可能与目前树冠及林下杂草等植被过高的郁闭度有关。研究显示,根、茎萌蘖苗建立根系需要8~10 a,这一期间,高郁闭度会影响萌蘖苗对光、热、水分及营养的利用,不利于新疆野苹果幼苗生长[16,18,23]。

相对20世纪70年代,伊犁地区在2016年和2017年新疆野苹果幼龄个体比例与2013年哈萨克斯坦种群相近,这一结果可能是伊犁地区保护区与放牧综合作用的结果,研究表明食果类动物取食果实,一方面能促进种子的萌发,另一方面可将多数种子带到适宜生境,扩大物种的分布,有助于物种的更新恢复[33-34]。在伊犁地区,部分保护区内的放牧活动虽然会造成新疆野苹果幼苗被啃食[35,29],但放牧可能有助于新疆野苹果种子的更新。而在哈萨克斯坦自然保护区内,严格禁牧活动降低了动物对新疆野苹果种子的扩散力及萌发率,即使林内有较大的种子库,也可能因种皮限制及长时间的休眠而不能萌发[36],这可能也是当前哈萨克斯坦新疆野苹果幼龄个体较少的原因。在2018年,对哈萨克斯坦研究区域的调查也发现,在面积为20~30 hm^2,放牧干扰20 a以上的试验区内,新疆野苹果种群密度为150~180棵·hm^{-2},树龄在20~30 a,与对照区相比,新疆野苹果种群得到有效恢复,可见,适当放牧对新疆野苹果种群的恢复具有积极作用。

4.4 生存函数在种群年龄结构分析中的应用与意义

利用生存分析函数可直观地反映植物种群结构与环境因素的关系及作用程度[20,28]。目前,该方法在植物种群结构分析中应用普遍,如对珍稀濒危物种海南龙血树、长苞铁杉、冷杉等种群结构的分析中都应用到了生存分析函数[26-27]。在本研究中,生存

分析函数显示,新疆野苹果种群在前期(幼龄期)锐减,后期(中老龄期)相对稳定。与不同时间相比,1969 年和 1970 年,哈萨克斯坦新疆野苹果种群结构最不稳定,幼龄期生存率、死亡密度最低,危险率、累积死亡率最高,在老龄期也表现出高危险率,其次为 2016 年和 2017 年新疆伊犁种群结构,同样在幼龄期死亡严重,尤其 I 龄级个体生存压力较大,而 2013 年,哈萨克斯坦种群相对稳定,幼龄期生存率、死亡密度相对较高,危险率、累积死亡率相对有所降低。以上结果说明新疆野苹果种群在幼龄期的生存受环境胁迫较大。不同时期与不同地区的胁迫因子及强度不同。早期(1969 年和 1970 年)哈萨克斯坦地区主要由于居民大量砍伐果木,生境遭到破坏,不利于新生幼苗生存;其次放牧普遍,造成幼龄个体难以存活[2]。据野外实际调查,在伊犁地区每年野苹果林内机械化收割牧草的操作严重影响了幼苗的生存,造成幼龄个体更新缓慢。

4.5 保护区的建立和管理问题

早期对新疆野苹果保护力度不强是 20 世纪 70 年代哈萨克斯坦新疆野苹果种群衰退的主要原因,现今,哈萨克斯坦由于保护区的建立,新疆野苹果种群逐渐趋于稳定,可见,保护区有利于新疆野苹果种群的更新与恢复。当前,我国新疆野苹果种群处于衰退状态,但整体年龄结构与 2013 年哈萨克斯坦种群相近,在未来种群有恢复的趋势,为此建议,在新疆尚未建立保护区的地区急需建立保护区,保护现有种群不受人为干扰。此外,降低林内的割草次数,禁止新疆野苹果种子的收购,以保护现存新疆野苹果幼苗数量,加大林下新疆野苹果的种子库。

哈萨克斯坦早期建立的新疆野苹果林保护区已有 80 a 以上的历史,近期建立的也有 20 a 左右[6]。保护区内严禁放牧,林内植物多样性丰富、郁闭度高,种子库相对较大,但高郁闭度使克隆苗木发育受到限制,加上牛羊等牲畜活动的减少,使种子传播及发芽率降低,影响幼苗更新数量。因此,在哈萨克斯坦新疆野苹果保护区,经过严格控制后,建议适度增加放牧,减少森林地表草本覆盖度,提高种子的发芽率,以加快新疆野苹果幼龄个体的更新和森林生态系统健康。

参考文献(References):

〔1〕 张新时. 伊犁野果林的生态地理特征和群落学问题〔J〕. 植物学报,1973,15(2):239－253.〔Zhang Xinshi. On the eco-geographical characters and the problems of classification of the wild fruit-tree in the ILI valley of Sinkiang〔J〕. Acta Botanica Sinica,1973,15(2):239－253.〕

〔2〕 阎国荣,许正. 中国新疆野生果树研究〔M〕. 北京:中国林业出版社,2010:108－109.〔Yan Guorong,Xu Zheng. Study on the Wild Fruit Trees in Xinjiang,China〔M〕. Beijing:China Forestry Publishing House,2010:108－109.〕

〔3〕 Volk G. *Malus sieversii*:Aadiverse central Asian apple apecies in the USDA-ARS national plant germplasm system〔J〕. Hortscience,2013,48(12):140－144.

〔4〕 李飞飞,崔大方,廖文波,等. 中国新疆野苹果〔*Malus sieversii* (Ldb.) Roem.〕种群地理分布格局及其遗传关系研究〔J〕. 干旱区地理,2011,34(6):926－932.〔Li Feifei,Cui Dafang,Liao Wenbo,et al. Geographic distribution pattern and genetic relationship of *Malus sieversii* (Ldb.) Roem. in China〔J〕. Arid Land Geography,2011,34(6):926－932.〕

〔5〕 羊海军,崔大方,许正,等. 中国天山野果林种子植物组成及资源状况分析〔J〕. 植物资源与环境学报,2003,12(2):39－45.〔Yang Haijun,Cui Dafang,Xu Zheng,et al. Analysis on the components and resource situation of seed plants in the wild fruit forest in Tianshan Mountain in China〔J〕. Journal of Plant Resources and Environment,2003,12(2):39－45.〕

〔6〕 Barbera G,Boschiero P,Latini L,et al. The Wild Apple Forests of the Tien Shan〔M〕. Treviso:Fondazione Benetton Studi Ricerche,2016:25－27.

〔7〕 刘华,臧润国,丁易,等. 天山西部新疆野苹果种群特征〔J〕. 林业科学,2010,46(11):1－7.〔Liu Hua,Zang Runguo,Ding Yi,et al. Population characteristics of *Malus sieversii* in the west part of Tianshan Mountains,Xinjiang〔J〕. Scientia Silvae Sinicae,2010,46(11):1－7.〕

〔8〕 傅立国. 中国植物红皮书〔M〕. 北京:科学出版社,1991.〔Fu Liguo. China Plant Red Data Book〔M〕. Beijing:Science Press,1991.〕

〔9〕 Tripathi R S,Khan M L. Regeneration dynamics of natural forests:A review〔J〕. Proceedings of the Indian National Science Academy,2007,73(3):167－195.

〔10〕 Singh S P,Tewari J C,Yadav S,et al. Population structure of tree species in forests as an indicator of regeneration and future stability〔J〕. Plant Sciences,1986,96(6):443－455.

〔11〕 Good N F,Good R E. Population dynamics of tree seedlings and saplings in a mature eastern hardwood forest〔J〕. Bulletin of the Torrey Botanical Club,1972,99(4):172－178.

〔12〕 李宁,白冰,鲁长虎. 植物种群更新限制——从种子生产到幼树建成〔J〕. 生态学报,2011,31(21):6 624－6 632.〔Li Ning,Bai Bing,Lu Changhu. Recruitment limitation of plant population:From seed production to sapling establishment〔J〕. Acta Ecologica Science,2011,31(21):6 624－6 632.〕

〔13〕 崔晓宁,刘德广,刘爱华. 苹果小吉丁虫综合防控研究进展〔J〕. 植物保护,2015,41(2):16－23.〔Cui Xiaoning,Liu De-

guang, Liu Aihua. Research progress in integrated management of *Agrilus mali*〔J〕. Plant Protection, 2015, 41(2): 16 – 23.〕

〔14〕秦伟,沙红,刘立强,等. 新疆野苹果资源遗传多样性 SSR 分析〔J〕. 果树学报, 2012, 29(2): 161 – 165.〔Qin Wei, Sha Hong, Liu Liqiang, et al. SSR analysis for genetic diversity of *Malus sieversii* from Xinjiang, China〔J〕. Journal of Fruit Science, 2012, 29(2): 161 – 165.〕

〔15〕赵佩. 新疆野苹果(*Malus sieversii*)繁殖相关特性及分子系统发育研究〔D〕. 天津:天津农学院, 2013.〔Zhao Pei. Characteres of Reproduction and Molecular Phylogenetic Analysis of *Malus sieversii*〔D〕. Tianjin: Tianjin Agricultural University, 2013.〕

〔16〕冯涛,张艳敏,陈学森. 新疆野苹果居群年龄结构及郁闭度研究〔J〕. 果树学报, 2007, 24(5): 571 – 574.〔Feng Tao, Zhang Yanmin, Chen Xuesen. Study on the age structure and density of the wild apple forest of *Malus sieversii*〔J〕. Journal of Fruit Science, 2007, 24(5): 571 – 574.〕

〔17〕刘忠权,董合干,梁巧玲,等. 孑遗植物新疆野苹果种群生命表与生存分析〔J〕. 干旱区资源与环境, 2016, 30(10): 98 – 103.〔Liu Zhongquan, Dong Hegan, Liang Qiaoling, et al. Life table and survival analysis of relict plant *Malus Sieversii* population〔J〕. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2016, 30(10): 98 – 103.〕

〔18〕程功,刘立强,颉刚刚,等. 新源野果林主要气象特征和人工更新集雨防草技术研究〔J〕. 经济林研究, 2018, 36(3): 127 – 135, 150.〔Cheng Gong, Liu Liqiang, Xie Ganggang, et al. Study on the main meteorological characteristics and artificial regeneration rain-collection and weeds-controlling techniques of wild fruit forest in Xinyuan〔J〕. Non-Wood Forest Research, 2018, 36(3): 127 – 135, 150.〕

〔19〕刘忠权,陈卫民,许正,等. 新疆天山西部野苹果林分布与苹果小吉丁虫危害现状研究〔J〕. 北方园艺, 2014(17): 121 – 124.〔Liu Zhonqquan, Chen Weiming, Xu Zheng, et al. *Malus Sievers* forest distribution and *Agrilus mali* Matsumura status of damage in the west part of Tianshan Mountains〔J〕. Northern Horticulture, 2014(17): 121 – 124.〕

〔20〕马闯,杨美玲,张云秀,等. 新疆野苹果(*Malus sieversii*)种群年龄结构及其动态特征〔J〕. 干旱区研究, 2018, 35(1): 156 – 164.〔Ma Chuang, Yang Meiling, Zhang Yunxiu, et al. Age composition and dynamic characteristics of the main populations of endangered *Malus sieversii*〔J〕. Arid Zone Research, 2018, 35(1): 156 – 164.〕

〔21〕李利平,海鹰,安尼瓦尔·买买提,等. 新疆伊犁地区野果林的群落特征及保护〔J〕. 干旱区研究, 2011, 28(1): 60 – 66.〔Li Liping, Hai Ying, Anwar Mohammat, et al. Community structure and conservation of wild fruit forests in the Ili valley, Xinjiang〔J〕. Arid Zone Research, 2011, 28(1): 60 – 66.〕

〔22〕Mambetov B T, Maisupova B D, Utebekova A D, et al. The observation of apple woods' natural regeneration in Transili Ala Tau〔J〕. Middle East Journal of Scientific Research, 2013, 17(11): 1 560 – 1 563.

〔23〕Forsline P L, Aldwinckle H S, Dickson E E, et al. Horticultural Reviews: Wild Apple and Fruit Trees of Central Asia, Volume 29〔M〕. New York: Wiley, 2010: 159 – 170.

〔24〕陈加利,姜喜,韩路. 人工林胡杨树高、基径、冠径与胸径的关系分析〔J〕. 中国农学通报, 2014, 30(16): 18 – 21.〔Chen Jiali, Jiang Xi, Han Lu. Analysis of relationship among tree height, basal diameter, crown diameter and breast diameter in the *Populus euphratica* Plantation〔J〕. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(16): 18 – 21.〕

〔25〕Khatry Chhetri D B, Fowler G W. Estimating diameter at breast height and basal diameter of trees from stump measurements in Nepal's lower temperate broad-leaved forests〔J〕. Forest Ecology and Management, 1996, 81(1 – 3): 75 – 84.

〔26〕杨立荣,张治礼,云勇,等. 濒危植物海南龙血树的种群结构与动态〔J〕. 生态学报, 2018, 38(8): 2 802 – 2 815.〔Yang Lirong, Zhang Zhili, Yun Yong, et al. The population structure and dynamics of *Dracaena cambodiana*, an endangered tree on Hainan Island〔J〕. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(8): 2 802 – 2 815.〕

〔27〕吴承祯,洪伟,谢金寿,等. 珍稀濒危植物长苞铁杉种群生命表分析〔J〕. 应用生态学报, 2000, 11(3): 333 – 336.〔Wu Chengzhen, Hong Wei, Xie Jinshou, et al. Life table analysis of *Tsuga longibracteata* population〔J〕. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(3): 333 – 336.〕

〔28〕张文辉,祖元刚,刘国彬. 十种濒危植物的种群生态学特征及致危因素分析〔J〕. 生态学报, 2002, 22(9): 1 512 – 1 520.〔Zhang Wenhui, Zu Yuangang, Liu Guobin. Population ecological characteristics and analysis on endangered cause of ten endangered plant species〔J〕. Acta Ecologica Sinica, 2002, 22(9): 1 512 – 1 520.〕

〔29〕刘璐,刘萍,刘双成. 新疆野苹果林土壤种子库物种组成及其空间分布特征研究〔J〕. 河北林果研究, 2015, 30(2): 146 – 150.〔Liu Lu, Liu Ping, Liu Shuangcheng. Species composition and space distribution characteristic of soil seed bank of *Malus Sieversii* in Xinjiang〔J〕. Hebei Journal of Forestry and Orchard Research, 2015, 30(2): 146 – 150.〕

〔30〕崔志军,张彦龙,罗朝辉,等. 苹果小吉丁虫(*Agrilus mali* Matsumura)对野苹果林的危害及其评估〔J〕. 干旱区研究, 2018, 35(5): 1 153 – 1 159.〔Cui Zhijun, Zhang Yanlong, Luo Zhaohui, et al. Damage of *Agrilus mali* Matsumura in wild apple forest and its assessment〔J〕. Arid Zone Research, 2018, 35(5): 1 153 – 1 159.〕

〔31〕成克武,周晓芳,臧润国,等. 新疆野苹果资源保护对策探讨〔J〕. 干旱区研究, 2008, 25(6): 760 – 765.〔Cheng Kewu, Zhou Xiaofang, Zang Runguo, et al. Study on the measures of conserving *Malus sieversii* resources in Xinjiang, China〔J〕. Arid Zone Research, 2008, 25(6): 760 – 765.〕

〔32〕李晓笑. 中国5种冷杉属植物生态濒危机制研究〔D〕. 北京:北京林业大学, 2013.〔Li Xiaoxiao. Ecological Study on Endangered Mechanism of Five *Abies* Species in China〔D〕. Beijing: Beijing Foresty University. 2013.〕

〔33〕 Traveset A. Effect of seed passage through vertebrate frugivores' guts on germination: A review〔J〕. Perspectives in Plant Ecology Evol System, 1998, 1(1): 151 – 190.

〔34〕 Samuels I A, Levey D J. Effects of gut passage on seed germination: Do experiments answer the questions they ask? 〔J〕. Functional Ecology, 2005, 19(2): 365 – 368.

〔35〕 郭仲军,刘丽艳,张炜银,等. 新疆野苹果资源现状分析及前景展望〔C〕//国际生物多样性计划中国委员会. 第七届全国生物多样性保护与持续利用研讨会论文集. 北京:气象出版社, 2006: 54 – 61.〔Guo Zhongjun, Liu Liyan, Zhang Weiyin, et al. Reveiew on the resources status and future development of wild *Malus Sievsrsii* in Xinjiang〔C〕//Chinese National Committee for DIVERSITAS. Proceedings of the Seventh National Symposium on the Conservation and Sustainable Use of Biodiversity in China. Beijing: China Meteorological Press, 2006: 54 – 61.〕

〔36〕 杨磊,廖康,佟乐,等. 影响新疆野苹果种子萌发相关因素研究初报〔J〕. 新疆农业科学, 2008, 45(2): 231 – 235.〔Yang Lei, Liao Kang, Tong Le, et al. Primary report on effect of related factor on germination of *Malus sieversii*（Ledeb.）Rome. seed〔J〕. Xinjiang Agricultural Sciences, 2008, 45(2): 231 – 235.〕

Age Structure of *Malus sieversii* Population in Ili of Xinjiang and Kazakhstan

ZHANG Ping[1,2], LYU Zhao-zhi[1,3], ZHANG Xin[1,3], ZHAO Xiang-ping[4], ZHNAG Yong-guang[1,3], Gulzhanat Tanabekova[5], Maisupova Bagila[6], Adilbayeva Zhanera[7], CUI Zhi-jun[8]

(1. *Xinjiang Institute of Ecology and Geography*, *Chinese Academy of Sciences*, *Urumqi* 830011, *Xinjiang*, *China*; 2. *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049, *China*; 3. *Key Laboratory of Biogeography and Bioresources*, *Xinjiang Institute of Ecology and Geography*, *Chinese Academy of Sciences*, *Urumqi* 830011, *Xinjiang*, *China*; 4. *Shihezi University*, *Shihezi* 832003, *Xinjiang*, *China*; 5. *Al-Farabi Kazakh National University*, *Almaty* 050040, *Kazakhstan*; 6. *Almaty Branch of "Kazakh Research Institute of Forestry" LLP*, *Almaty* 050000, *Kazakhstan*; 7. *Kazakh National Agrarian University*, *Almaty* 050010, *Kazakhstan*; 8. *Gongliu Forestry Bureau*, *Gongliu* 835400, *Xinjiang*, *China*)

Abstract: Environmental and human stress accelerate the loss of wild apple habitats in Central Asia, causing the decline of population and viability of wild apples. In this paper, the population of a tertiary relict plant *Malus sieversii* (Ledeb.) Roem. was studied. The status of wild apple population was systematically surveyed, and the age structure, fruit yield and population dynamic change of wild apple in Xinjiang (Ili River Valley) of China and Kazakhstan were compared. The results showed that the population age structure was currently and even in the 1970s dominated by the middle-aged (15 – 50 cm) trees, and the proportion of young (0 – 15 cm) and old (50 – 75 cm) trees was low in the Ili River Valley of Xinjiang and Kazakhstan. Compared with the population in Xinjiang, the life vitality of wild apple population was weaker while the fruit yield was relatively high, and the population was in a severe decline (Deevey-Ⅲ) in Kazakhstan from 1969 to 1970. In 2013, the population of wild apple trees in Kazakhstan showed a strong life vitality and stable population structure (Deevey-Ⅱ). The key factor that resulted in the decline of wild apple population was the lack of young individual trees. Detailed advices were proposed to the conservation and regeneration of wild apple forest in Xinjiang and Kazakhstan. For Kazakhstan, an appropriate level of grazing was suggested to enhance the seed spreading and germinating. For Ili of Xinjiang, the conservation areas should be established, while the wild apple fruit collection and mowing in wild apple forest should be prohibited or under well control so as to protect the seedlings as well as the natural seed bank.

Key words: *Malus sieversii* population; static life table; age structure; Ili of Xinjiang; Kazakhstan